

高温 MEMS 剪应力传感器残余应力分析¹⁾

纪科星 宋宏伟²⁾ 范学军

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 采用理论分析与数值模拟相结合的方法, 研究了残余应力对静电反馈式 MEMS 高温剪应力传感器的结构设计的影响. 研究表明: 在电极宽度和间距不变的情况下, 增加电极数和减小电极长度可有效地减小由静电力引起的应力和变形; 残余应力对结构应力和变形的影响远大于静电力.

关键词 MEMS, 剪应力传感器, 残余应力, 有限元

中图分类号: TH703 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2010)01-060-04

RESIDUAL STRESS IN HIGH TEMPERATURE MEMS SHEAR STRESS SENSOR¹⁾

Ji Kexing SONG Hongwei²⁾ FAN Xuejun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The effect of residual stress on the structural design of high temperature MEMS shear stress sensor is analyzed both theoretically and numerically. It is found that under the condition of constant electrode width and electrode gap, the increase of electrode number and the decrease of electrode length will effectively reduce the electrostatic-force induced stress and deformation. The residual stress originated from MEMS fabrication, however, shows much stronger influence on the stress and deformation than that of electrostatic force. Therefore, the residual stress must be seriously considered for the reliability of the structure. The analytical results can be a reference for the structural design of this innovative high temperature MEMS shear stress sensor.

Key words MEMS, shear stress sensor, residual stress, finite element

精确地获取壁面摩阻信息是评估超燃冲压发动机性能和计算壁面热流的重要环节^[1]. 在恶劣的超燃环境下进行测试, 需要传感器具有耐高温、耐腐蚀、大量程、高空间分辨率和高时间分辨率(频率响应)等特征. 常规剪应力传感器不具备以上功能, 采用新型耐高温材料制备的 MEMS 微结构传感器则有可能满足上述要求. 文献 [2] 在此方面展开了一些前期工作, 但并未给出具体的设计准则, 特别是没有详细论述残余应力对结构设计的影响. 本文针对 MEMS 高温剪应力传感器的结构特点进行了分析, 并采用理论分析与数值模拟相结合的方法, 考察了静电力、温度和残余应力对结构设计的影响.

1 MEMS 剪应力传感器结构特征及工作原理

传感器的结构示意图如图 1 所示, 主要由剪应力感应板、飞梭结构、固定电极以及弹簧等组成, 主体结构采用 SiC 薄膜材料. 飞梭上梳齿状排列的移动电极插入固定电极对中间, 组成运动电极队列. 电极队列采用反对称设计, 以保证在左侧或右侧有来流的情况下均可以正常工作. 弹簧用来支撑与约束整个结构.

高温气体流过传感器表面, 剪切力使感应板(面积 A_s)与梳齿结构(单侧齿数 N_f , 厚度 h)一起沿流向产生位移, 使移动与固定电极间距(基准间距 d_0)

2008-11-05 收到第 1 稿, 2009-06-10 收到修改稿.

1) 总装备部预研基金项目和国家自然科学基金资助 (10502049).

2) 宋宏伟, 副研究员, 主要研究方向: 轻质复合材料力学、热结构分析、多孔材料力学性质. E-mail: songhw@imech.ac.cn

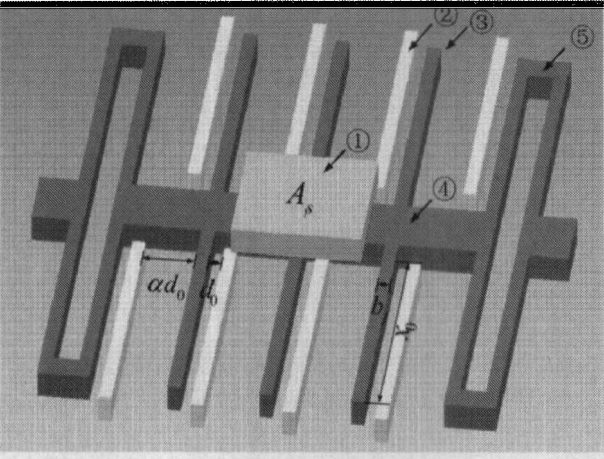


图 1 剪应力传感器结构简图

(①感应板; ②固定电极; ③移动电极; ④飞梭; ⑤弹簧)

发生变化, 改变两者之间的电容. 通过外部检测电路可以测量电容的变化 δC , 经标定可获得剪应力强度. 由弹簧 (刚度 K_s) 恢复力与剪应力的平衡可得结构可测最小剪应力 τ_{\min} , 也即测量精度

$$\tau_{\min} = \frac{\delta C_{\min} K_s (\alpha d_0)^2}{2 N_f x_0 A_s \epsilon h (\alpha^2 - 1)} \quad (1)$$

其中, α 为基准间距倍数, ϵ 为介电常数, x_0 是电极交叠长度, 参见图 1. 由于电极间空间有限, 仅通过电极位移产生的电容量变化很小, 能够测量的剪应力范围不大. 为了进一步提高应力测量范围, 在移动与固定电极之间外加一个偏转电压 V , 该电压产生一个静电力作用于运动电极上, 大小与剪切力相等但方向相反, 使运动电极维持在平衡位置, 而剪应力 τ 的大小可以通过该偏转电压值的高低来确定 [2].

$$\tau = \frac{N_f x_0 h \epsilon}{2 A_s} \left[\frac{\alpha^2 - 1}{(\alpha d_0)^2} \right] V^2 \quad (2)$$

当偏转电压达到 V_{\max} 时, 由式 (2) 可得最大可测剪应力 τ_{\max} .

2 MEMS 结构理论分析

从 MEMS 的工作原理可知, 结构的主要受力部件为运动电极对. 如图 2, 考察单个移动电极 (长 L_f , 宽 b_f), 受到剪应力 F 和均匀的静电力 P 的作用, 并存在制造残余应力 σ_r .

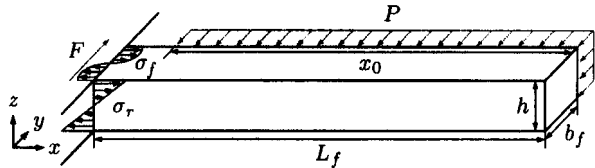


图 2 电极受力示意图

首先分析电极仅受静电力和剪应力作用时的最大应力 (x 向) 和最大变形 (y 向)

$$\sigma_f = \frac{M_{\max} y}{I_z} = \frac{3 \tau A_s x_0}{N_f h b_f^2} \quad (3)$$

$$\delta_f = \frac{q l^4}{8 E I} = \frac{3 \tau A_s x_0^3}{2 N_f h E b_f^3} \quad (4)$$

然后考虑残余应力的作用. MEMS 薄膜材料在制备过程中往往存在着很大的残余应力, 其形成机理比较复杂, 主要受薄膜沉积工艺、热处理工艺以及材料本身机械特性影响 [3,4]. 参考文献 [2], SiC 薄膜沿厚度方向 (z 向) 残余应力梯度为 $50 \text{ MPa}/\mu\text{m}$, 由此引起的 z 向最大变形为 [5]

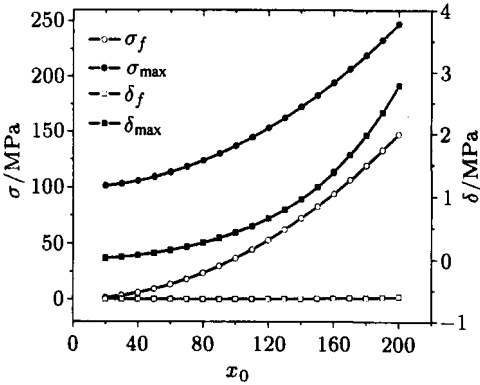
$$\delta_r = \frac{2 \sigma_r x_0^2}{3 h E} \quad (5)$$

由图 2 看出, 最大应力都是 x 向的, 可以简单叠加. 最大变形可以矢量合成

$$\sigma_{\max} = \sigma_f + \sigma_r \quad (6)$$

$$\delta_{\max} = \sqrt{\delta_f^2 + \delta_r^2} \quad (7)$$

由于受制备工艺限制, A_s, b_f, h 和 d_0 都已确定, 主要设计变量是 N_f 和 x_0 . 根据式 (3)~(7), 可考察结构变化时有、无残余应力对结构应力和变形的影响, 如图 3 所示. 随着电极齿数增大, 电极长度减小, 应力和变形都随之减小; 残余应力的存在对于结构的应力和变形都有很大的影响, 电极越长, 由残余应力引起的面外偏转越严重. 综合来看, 电极数在 20~40 之间, 电极长度在 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间时应力和变形可以控制在设计范围内.



(a) 随 x_0 的变化

图 3 应力和变形随 x_0 和 N_f 的变化

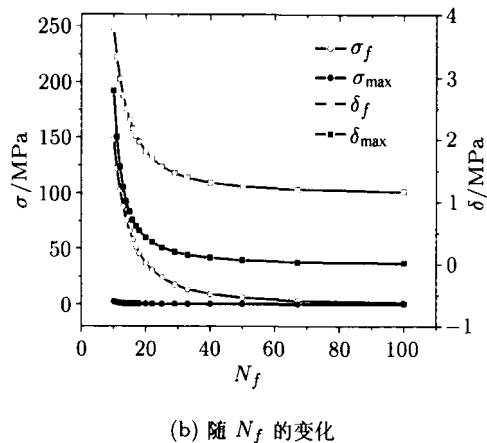


图 3 应力和变形随 x_0 和 N_f 的变化 (续)

3 数值模拟研究

对传感器结构采用 ANSYS 参数化建立有限元模型, 齿数 N_f , 齿长 L_f 作为变量. 两端弹簧施加固定约束, 感应板上沿正 y 向加载 1 kPa 的剪应力, 移动电极上加载与之平衡的沿负 y 向的静电力, 采用等效力法模拟残余应力梯度. 传感器也受高温测试环境中热载荷的影响, 根据傅里叶导热定律

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} \tag{8}$$

以 6 马赫飞行的超燃冲压发动机隔离段壁面热流 q 约为 40 W/cm², 可将其作为感应板上的热流载荷. 由于 MEMS 结构非常薄 (2~4 μm), 根据式 (8) 可推算厚度方向的温差不超过 5×10⁻³ K, 同时, 采用主动冷却的燃烧室壁面温度可维持在 1200 K 左右, 因此数值模拟中加载按此温度加载均匀温度场. 不同的 SiC 制备工艺获得材料性能会有很大差别, 其中 APCVD 和 LPCVD 法获得的单晶和多晶 3C-SiC 薄膜更适合高温剪应力传感器 [6]. 本文数值计算中采用的 SiC 性能数据见表 1 [7].

表 1 SiC 薄膜材料性能

温度 / K	热膨胀率 / (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	导热系数 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热 / (J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	弹性模量 / GPa
300	4	320	0.7	420
1200	5.4	63	1.23	355

图 4 为数值计算获得的移动电极应力分布云图. 由图 5 可以看到数值结果和理论分析结果非常吻合, 应力误差只有几兆帕, 相对于残余应力来说非常小. 应力随温度几乎没有变化, 这也与理论分析结果一致, 因为应力公式中没有与温度有关的项. 变形结果比理论结果略小, 主要是由于有限元方法单元刚度较大, 导致变形过小. 变形随温度升高而增大, 因为弹性模量随温度升高而下降.

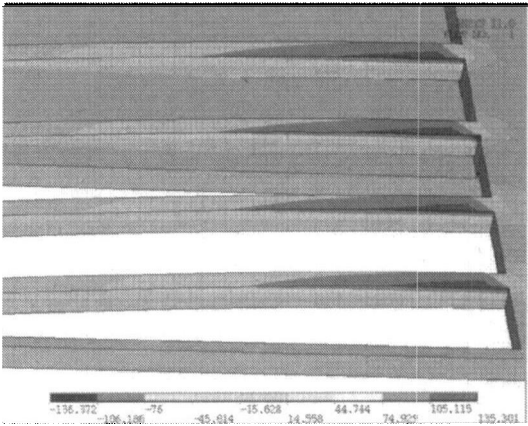
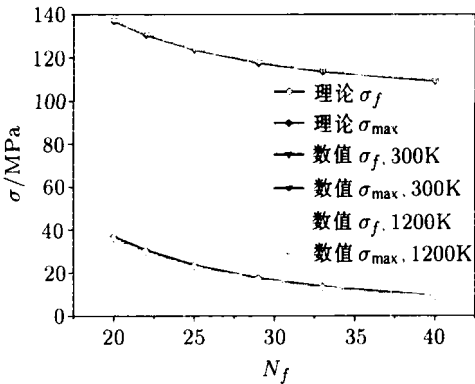
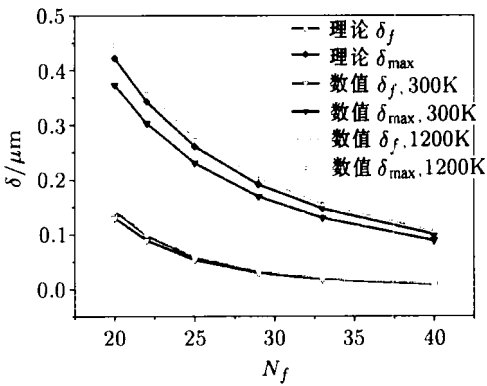


图 4 移动电极上的应力云图和变形情况



(a) 应力



(b) 变形

图 5 理论与数值结果

4 电场边缘效应分析

在前面的分析中, 计算静电力时没有考虑电场的边缘效应, 这可能会造成一些误差. 对于长为 x_0 , 厚度为 h 的电极, 考虑了电场的边缘效应后的静电力可以表示为 [8]

$$F = \frac{\epsilon h x_0 V^2}{2d_0^2} + \frac{\epsilon h x_0 V^2}{2d_0(\pi h + d_0)} + \frac{\epsilon h x_0 V^2}{2d_0(\pi x_0 + d_0)} \tag{9}$$

式 (9) 右边第 1 项就是无限大平板的静电力公式, 后两项是在有限尺度下对边长为 x_0 和 h 的两个边缘电场的修正项. 当 $x_0 \gg h$, $x_0 \gg d_0$ 时, 式 (9) 可进一步简化为

$$F = \frac{\varepsilon h x_0 V^2}{2d_0^2} + \frac{\varepsilon h x_0 V^2}{2d_0(\pi h + d_0)} \quad (10)$$

由于边缘效应造成的误差为

$$\Delta = \frac{d_0}{\pi h + d_0} \quad (11)$$

可见这一误差主要与电极基准间距和电极厚度有关, 由于受制备工艺限制, 这几个参数变化的余地不大. 本文中根据现有制备条件, 将 d_0 取得尽量小, h 取得尽量大, 这个误差基本控制在可接受的范围内. 由于 d_0 和 h 都已取为定值, 这一误差对前面的分析结果没有本质的影响.

5 结 论

研究表明, 残余应力对结构的应力和变形影响很大. 以 20 齿的理论计算结果为例, 当仅考虑静电力时, 电极上的最大应力和变形分别是 36 MPa 和 0.14 μm ; 考虑残余应力后, 则分别增大至 137 MPa 和 0.42 μm . 同时, 残余应力引起的面外翘曲变形会减小电容相对面积, 减弱静电力作用. 因此制造过程中应尽量减少残余应力. 温度对应力没有影响, 变形则随温度增加而增大, 但是并不显著. SiC 材料在高温下依旧能保持良好的性能; 增大电极齿数, 减小电极长度能够有效减小应力和位移, 但同时也会增大结构尺寸. 上述研究对于指导新型 MEMS 高温剪应力传感器设计具有重要意义.

参 考 文 献

- 1 瞿章华, 曾明, 刘伟等. 高超声速空气动力学. 北京: 国防科技大学出版社, 1999
- 2 Tiliakos N, Papadopoulos G, O'Grady AM, et al. A MEMS-based shear stress sensor for high temperature applications. Fedsm 2007: Proceedings of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference, Vol 2, Pts A and B, 2007: 1477~1492
- 3 虞益挺, 苑伟政, 乔大勇. 微机械薄膜残余应力研究. 微细加工技术, 2005, (2): 46~50 (Yu Yiting, Yuan Weizheng, Qiao Dayong. Study on residual stresses in MEMS thin films. Microfabrication Technology, 2005, (2): 46~50 (in Chinese))
- 4 张向军, 孟永钢, 温诗铸. 微电子机械系统中的若干固体力学问题. 力学与实践, 2003, 25(2): 7~11 (Zhang Xiangjun, Meng Yonggang, Wen Shizhu. Research on several mechanical problems in microelectromechanical systems. Mechanics in Engineering, 2003, 25(2): 7~11 (in Chinese))
- 5 范钦珊, 殷雅俊. 材料力学. 北京: 清华大学出版社, 2004 (Fan Qinshan, Yin Yajun. Materials Mechanics. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 (in Chinese))
- 6 崔梦, 胡明, 严如岳. SiC 薄膜材料在 MEMS 中应用的研究进展. 压电与声光, 2004, (6): 482~484, 490 (Cui Meng, Hu Ming, Yan Ruyue. Progress of SiC film used in MEMS. piezoelectrics & acoustooptics, 2004, (6): 482~484, 490 (in Chinese))
- 7 Chollon G, Naslain R, Prentice C, et al. High temperature properties of SiC and diamond CVD-monofilaments. Journal of the European Ceramic Society, 2005, 25(11): 1929~1942
- 8 赵剑, 王洪喜, 贾建援. 计及边缘效应的静电驱动微结构静电力计算. 微纳电子技术, 2006, 2: 95~97, 111 (Zhao Jan, Wang Hongxi, Jia Jianyuan. Computation of electrostatic forces with edge effects for micro-structures. Micronanoelectronic Technology, 2006, 2: 95~97, 111 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

(上接第 87 页)

维方式, 掌握这种思维方式要比解决一两道难题重要得多, 而且学习不是一朝一夕的事, 要经过不断积累和反复练习才能熟练掌握知识; 另一方面, 对学习有困难的同学耐心倾情辅导, 帮助他们分析学习方法的得失, 通过提高成绩逐步建立学习信心.

2 结束语

三本院校上好理论力学课的难度很大, 笔者在教学中利用本文所述的经验和方法虽然在激发学生兴趣, 讲活讲好力学知识等方面取得了较好的效果, 但要真正的提高三本院校

理论力学的教学质量, 还有很长的路要走, 要经过长期不断的实践和摸索, 更要依靠广大同行的共同努力. 在这里, 笔者将教学中总结的经验与各位同行加以探讨, 请同行们不吝指教.

参 考 文 献

- 1 朱振铎. 谈标枪结构的演变. 力学与实践, 2008, 30(3): 91~92
- 2 张昌芳, 刘家福. 抖空竹的力学原理分析. 力学与实践, 2006, 28(4): 89~92

(责任编辑: 刘俊丽)